T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	原子炉圧力容器調査のための軽量テレスコピックブームの開発
Title(English)	Development of lightweight telescopic boom for reactor pressure vessel research
著者(和文)	鄭冰, 難波江裕之, 鈴森康一, 木倉宏成, 高橋秀治, 遠藤玄
Authors(English)	Hyo Tei, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Hiroshige Kikura, Hideharu Takahashi, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2021講演論文集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2021, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

原子炉圧力容器調査のための軽量テレスコピックブームの開発

Development of lightweight telescopic boom for reactor pressure vessel research

学　鄭　冰（東工大）　正　難波江裕之（東工大）
正　鈴森康一 (東工大)　正　木倉宏成（東工大）
正　高橋秀治 (東工大)　正　○遠藤　玄（東工大）

Bing ZHENG, Tokyo Tech, tei.h.ac@m.titech.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech, nabae@mes.titech.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech, suzumori.k.aa@m.titech.ac.jp
Hiroshige KIKURA, Tokyo Tech, kikura@lane.iir.titech.ac.jp
Hideharu TAKAHASI, Tokyo Tech, htakahashi@lane.iir.titech.ac.jp
Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station is a national urgent problem in Japan. To analyze and characterize the fuel debris distributed in Reactor Pressure Vessel (RPV), the optical fiber LIBS analysis method can be a promising solution. To deploy the LIBS sensor to the RPV, I have developed (1) a lightweight telescopic boom that can carry the sensor to the RPV, (2) a mechanism that stores the cable according to boom's expansion and contraction. The boom expands/contracts by winding/unwinding the synthetic fiber ropes. The cable storage mechanism stores the cable in a plane that is perpendicular to the extension direction in synchronization with the extension/contraction. The proposed mechanical design achieved a compact and lightweight mechanism of the boom. The mass, maximum length and payload were 3.18 kg, 6.03 m, and 2.48kg, respectively. The basic operation by a prototype model was successfully demonstrated.

***Key Words*:** Decommissioning support, Wire drive, Telescopic boom

1　緒言

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けて，燃料デブリを取り出すために，原子炉の内部調査が続けられている．近年の放射線の線量調査により，格納容器 (PCV) の底の部分の線量があまり上昇しないことから，PCV の上側の圧力容器 (RPV) 内に燃料デブリがある可能性がわかった [1]．RPV に進入するためには，高さ 5 m で制御棒駆動機構 (CRD) が密集した狭い空間を通過する必要がある．

本研究室では，PCV 内部に調査機器を運ぶことを想定した，長尺多関節ロボットアーム (Super Dragon) を開発した [2]．しかし，RPV まで到達するにはアームの長さが足りないため，新たに測定機器を上に運搬する機構の開発が求められる．また，燃料デブリの成分分析にファイバ LIBS システム [3] を想定しているため，光ファイバケーブルを同時に運搬する機構の開発が求められる．要求仕様として，全体の質量を 10 kg，伸展長さを 5 m，伸展部の直径を 100 mm，重心位置をベースから 1.3 m の範囲内，光ファイバケーブルを収容できる空間を有する必要がある．

図 1 に RPV 内燃料デブリ調査のロードマップを示す．現状の Super Dragon では (1) の RPV に到達するための穴を見つける作業を実現できる．本研究では (2) のさらに上方に昇り，RPV まで計測機器を運搬できるテレスコピックブーム機構と，その伸縮に同期したケーブル格納機構の提案と試作を目的とする．(3) は RPV の底に到達し，計測機器で周囲を計測する様子である．

先行研究において，最小曲率半径に制限のあるケーブルを用いた運搬機構の研究 [4] はあるが，CRD 内のような狭い空間での利用を想定したものは少ない．解決すべき課題は 2 つあり，1 つ目はテレスコピックブームの機構の軽量化と細径化の実現で，2 つ目はファイバ LIBS システムを利用するための，伸展に合わせたケーブルの繰り出し／巻き取り機能の実現である．本研究では，以上の課題を解決するためのテレスコピックブーム機構とケーブル格納機構を提案し，その有用性を試作機により実証した．

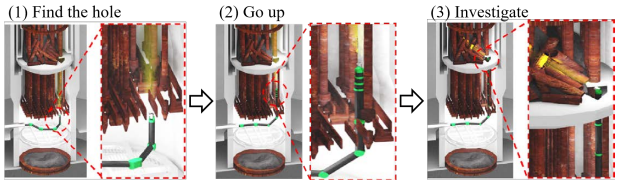

Fig.1 Roadmap for fuel debris survey in pressure vessels

2　テレスコピックブームの試作

試作したテレスコピックブームを図 2 に示す．伸展部は 4 本の径の異なる CFRP のパイプを同一軸上に配置したテレスコピック構造で構成され，収縮時は 1810mm，展開時は 6030mm となる．中央にケーブルを配置する直径 20mm の縦の空間があり，その空間に容易に光ファイバケーブルを配置可能なワイヤ駆動系で設計した．そして，伸展するためのワイヤ駆動機構が 3 セット 120 ℃に等配され，直径　2mm で側糸が高密度ポリエチレン繊維，芯糸が PBO 繊維である高強度化学繊維ロープ（DY-20ZL:ハヤミ工産）を 3 本使用した．これらのロープを駆動するために，コストが高く複雑な制御を必要とするが，最も確実な方法である 3 つのモータとセンサ系による駆動を最初に検討し，これを簡素化していくことで 1 つのモータで駆動が可能か検討した．

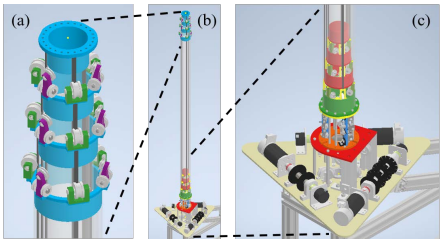

Fig.2 Mechanical design of the telescopic boom (a) boom end, (b) overview, and (c) base structure with rope driving mechanism

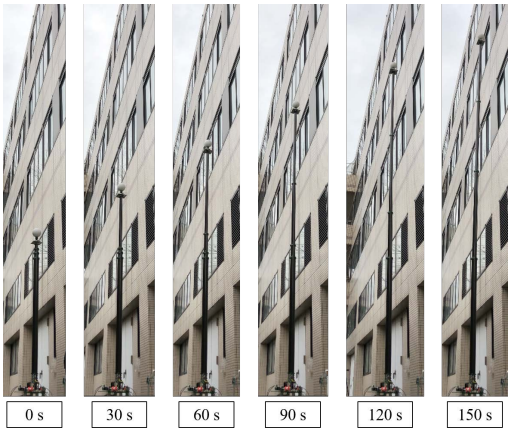

Fig.3 Operation of the extension part

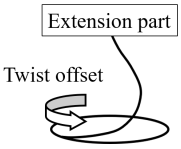

Fig.4 Proposed cable storage method

ロープ・プーリの配置を工夫することにより，プーリ径を確保できるほか，パイプ間の直径差を小さくすることができた．軽量化のため追加のセンサを用いないことが望ましいが，センサなしで制御できるか不明なため，張力センサとロープ変位量センサを 3 組製作し，根元に取り付けた．ベースの部分には 3 つのモータがあり，そのうち 1 本の軸に 3 連のリールを設けることで，1 つのモータで 3 本のロープを同時に駆動できるようにした．

3　テレスコピックブームの動作試験

試験の様子を図 3 に示す．1 つのモータ／3 つのモータによる駆動法のどちらも，ロープのプーリの経由による張力の減衰やテレスコピックブーム可動部での摩擦により，収縮時の平均張力が伸展時に比べ小さかった．2 つの駆動法を比較したところ，1 つのモータでは個々のロープの張力は変動するが，平均ロープ張力は 3 つのモータによる駆動と変わらなかった．また，1 つのモータによる駆動法では，張力センサとロープ変位量センサを用いなくても駆動することができる可能性があることがわかった．

次に，レーザスキャナを用いて，先端位置制御精度の評価を行った．1 つのモータと 3 つのモータによる駆動を伸展長さの異なる 7 つの位置で静止させ，水平位置を比較したところ，ずれは 50mm の範囲内に収まった．1 つのモータによる駆動は 3 つのモータによる駆動と同等の性能を持つことがわかった．

4　ケーブル格納機構の試作

アンテナカーのように，伸展部の周りにケーブルが巻かれて格納する方法が一般的である．しかし，本研究では外環境との接触を防ぐほか，想定している石英ファイバに 200mm の最小曲げ半径の制約があるため，内部にケーブルを格納することを検討した．

ケーブルの自重を利用し，光ファイバケーブルの最小曲率半径を満たすことのできる格納方法を考案した（図 4）．さらに中心部とファイバ格納部分を相対回転させることで，伸展の際に生じるねじれを相殺することができる．そして，軽量化・簡素化のため，伸展に用いたアクチュエータを用いて格納部分を駆動した．図 5 に示すように，モータの動力をリール軸を通じ，傘歯車，平歯車に伝達することで，ロープ巻き取り部分とファイバ格納部分の同期した回転運動を実現した．最終的に，最小曲げ半径が 185 mm，ケーブル格納機構の重量は 2.9 kg となった．

5　ケーブル格納機構の動作試験

試験の様子を図 6 に示す．赤いケーブルは直径 10 mm の銅線の被覆ケーブルを光ファイバケーブルの代替として用い，格納部分を回転する方法（伸展部は固定）と，伸展部を回転する方法（格納部分は固定）双方の動作を確認し．伸縮部の伸展／収縮に同期して，ケーブルを繰り出し／巻き取る機能を実現した．また，内部に通すケーブルの被覆の摩擦係数が大きいと巻き取りに問題が生じる課題を確認したが，摩擦係数の低い被覆のケーブルを使用することで解決できる可能性がある．

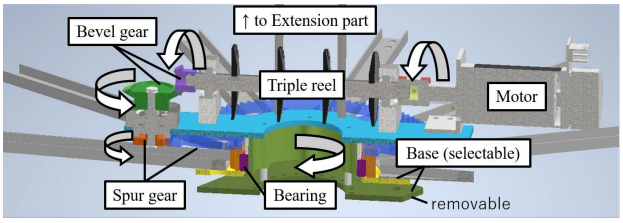

Fig.5 Cross section of optical fiber feeding mechanism

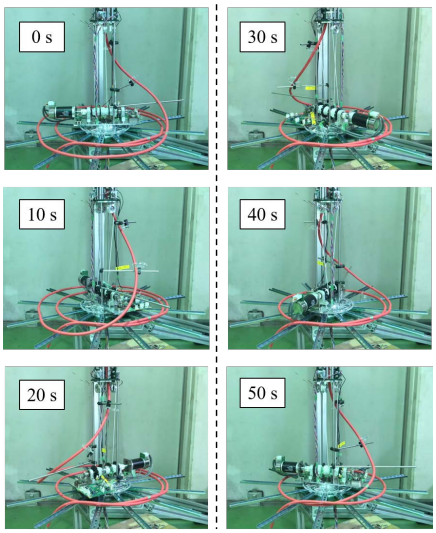

Fig.6 Cable storage mechanism (rope feeding)

6　結論

本研究では，原子炉の狭空間高所部を元素組成分析するためのテレスコピックブームと，レーザを伝送する光ファイバを先端に繰り出し／巻き取る機構の試作と評価を行った．1 つのモータ／3 つのモータによる駆動で比較し，1 つのモータによる駆動が可能とわかった．テレスコピックブームの伸縮に応じてケーブルを繰り出し／巻き取る格納機能を確認した．今後は，光ファイバケーブルを駆動させた際の特性の調査と Super Dragon の先端の搭載を行い，模擬試験で成分分析ができるかを検証していく．

謝辞

本研究は，JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA19P 19210348 の助成を受けました．

参考文献

[1] TEPCO, ”燃料デブリ取り出しの状況”, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., Retrieved January 30, 2021, https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/.

[2] 堀米篤史; 遠藤玄; 鈴森康一. 超長尺ワイヤ駆動型多関節アームの開発―干渉ワイヤ駆動機構と自重補償機構による駆動方式の提案―. In: ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016. 一般社団法人 日本機械学会, 2016. p. 2P1-15a5.

[3] K. Akaoka, ”Measurement of Uranium Spectrum using Laser Induced Breakdown Spectroscopy : High Resolution Spectroscopy (470-670nm)”, JAEA-research, vol. 1-2, pp. 1-40, May 2016.

[4] FELKAI, Roland. Design and development of a telescopic axial boom. In: Proc. 20th Aerospace Mechanisms Symposium. 1986.